



TITLE:

# <大学の研究・動向> 超小型放電型核融合中性子源開発研究の現状と地雷探査への応用

AUTHOR(S):

吉川, 潔; 長崎, 百伸; 増田, 開

---

CITATION:

吉川, 潔 ...[et al]. <大学の研究・動向> 超小型放電型核融合中性子源開発研究の現状と地雷探査への応用. Cue 2003, 11: 6-10

ISSUE DATE:

2003-06

URL:

<https://doi.org/10.14989/57857>

RIGHT:

# 超小型放電型核融合中性子源開発研究の現状と地雷探査への応用

エネルギー理工学研究所エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野

教授 吉 川 潔

kiyoshi@iae.kyoto-u.ac.jp

助教授 長 崎 百 伸

nagasaki@iae.kyoto-u.ac.jp

助手 増 田 開

masuda@iae.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

「核融合」という言葉を聞くと、「人類にとっての夢のエネルギーではあるけれど、実現までにはこれからまだ数十年もかかり、また開発費用も数千億円かかる」というイメージを持つ方が多い。たしかに、現在よく新聞紙上をにぎわすITER（国際熱核融合実験炉；International Thermonuclear Experimental Reactor）が目指す核融合商用発電のための開発研究においては的を射ている。が、ここにのべる超小型放電型（IEC; 慣性静電閉じ込め、Inertial-Electrostatic Confinement）核融合中性子源は、重水素ガスを満たした直径30cmほどの超小型球状真空容器内で核融合反応を起こすもので、中心部分におかれた中空球殻状陰極と容器（陽極を兼ねる）間の電気放電により、簡単かつ定常的に核融合反応を生起する装置である。エネルギー出力という点では1W（～毎秒 $10^{12}$ 個の核融合反応率に相当）よりはるかに低い。しかし、高エネルギーの中性子や陽子が簡単かつ大量に生成できる等多くのユニークな特徴を備えているので、将来さまざまな産業分野における先端的利用が期待されている（図1）。本稿では、この装置についての簡単な説明と、最近注目されているアフガニスタンでの地雷探査への応用などについて紹介したい。

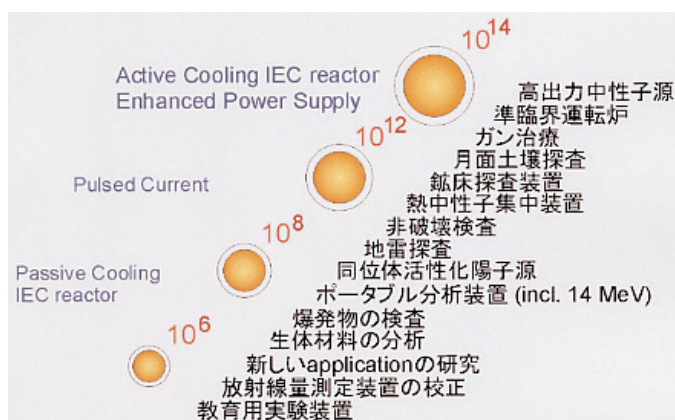


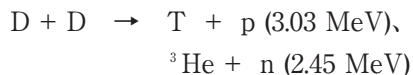
図1 放電型核融合中性子・陽子源の応用（単位はn/s）

## 2. 慣性静電閉じ込め(IEC)核融合中性子源

### 2.1 中性子源の歴史

現在、中性子源としてはAmBeや $^{252}\text{Cf}$ が賞用されているが、中性子源強度やパルス化の点で難点があり、大強度化などには放射線規制の問題がある。一方、重水素と三重水素を用いるDTチューブと呼ばれる超小型加速器タイプの中性子源（重水素イオンを数百keVに加速してターゲットに含浸させたトリチウムに衝突させ核融合反応を生起）は石油探索などで賞用されているが、寿命や熱的制約、放射性物質規制などのため中性子強度や寿命の増大の点で大きな制約がある。

これらに対して、本中性子源であるIEC装置は以下の重水素核融合反応（各50%の確率）



であるため、トリチウムに関わる放射線規制がなく（X線規制はある）、また強力な非定常パルス運転のみならず定常運転も容易であるのでその装置利用率は極めて高く、工業的にも経済的にも大きな利点・競合性を有する。

この概念は既に1930年代に出されたが、ようやく1967年にHirshが複数のイオン源を用いてはじめてD-T核融合で $10^9$  n/sの生成に成功した。その後、しばらくの間極めて精力的に研究されたが、磁気閉じこめトカマクが主力方式に選択されるに及んで研究が中断された。1992年、装置の簡便化と低中性子束応用分野からの要請で、イリノイ大学がより簡単な現在主流のグロー放電方式のIEC核融合中性子源を開発しその優秀性を示した。これを受けて、ウイスコンシン大学、ロスアラモス国立研究所、京都大学エネルギー理工学研究所などが相次いで研究を開始し、既に毎秒あたり $10^8$ 個以上の中性子発生数（同数の陽子が発生）を達成している（表1）。その発生率をさらに2～3桁増加させることができれば、応用領域が大きく拡大し、新たな産業を創出する事が可能となる。

表1 各研究機関での中性子束生成量

(2002年3月現在)

	中性子発生率 [n/sec]
京都大エネ研	$1.1 \times 10^7$ (定常; 62kV30mA)
米国イリノイ大学	$2 \times 10^6$ (定常) $7 \times 10^8$ (パルス)
米国ウイスコンシン大学	$1.1 \times 10^8$ (定常, D-D, 135kV, 58mA) $1.6 \times 10^8$ (定常, D- ${}^3\text{He}$ )
米国ロスアラモス国立研究所	$1 \times 10^6$ (定常)
東京工業大	$5 \times 10^5$ (定常) $2 \times 10^6$ (パルス; 30kV, 2A)
日立製作所	$7.5 \times 10^7$ (定常)

## 2.2 慣性静電閉じこめ核融合中性子源の原理

IEC核融合中性子源（図2）は、球状の真空容器（陽極）内に同心球状に幾何学的透過率の高い陰極を設置したものであり、陰極への電圧導入端子による影響を除いてほぼ球対称な電位分布が形成される。IECではグロー放電（図3）で生じたイオンの多くは陰極を通り抜け中心へ向かい核融合反応を起こす。再度陰極を通り抜け真空容器へ向かうイオンは、陰極により減速され、再び陰極内へ再加速される。この運動は、イオンが真空容器や陰極に衝突したり、電子により中性原子に戻されたり、核融合反応を生起するまで繰り返される。その結果、球形固体陰極による放電に比べイオンの寿命は

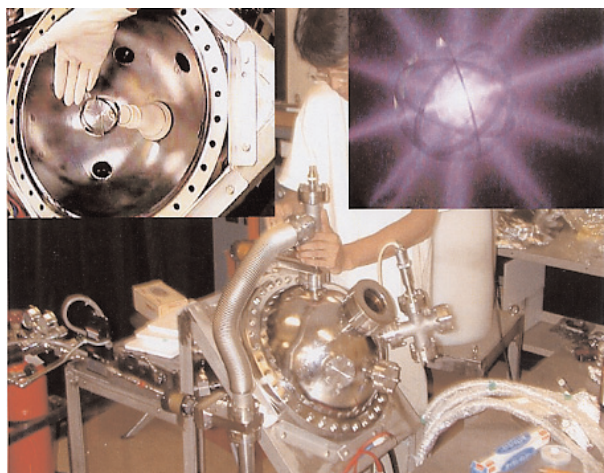


図2 放電型核融合中性子源

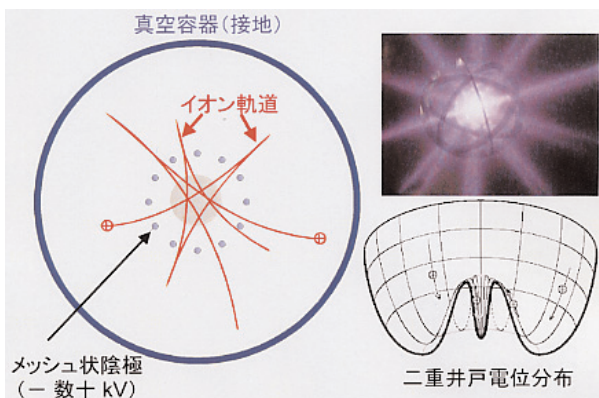


図3 グロー放電（スターモード）と二重井戸電位分布

遙かに長くなり、電離効率の大幅な向上と共に、イオン同士の衝突やイオンと中性原子との衝突による核融合を高効率で生じさせることが可能となる。

## 2.3 これまでの研究成果

本研究グループは我が国で初めて1991年に研究に着手し、今日まで広範にわたる理論・実験研究を行ってきた。その間、収束イオンビーム空間電荷効果を自己無撞着に計算できる粒子シミュレーションコードを開発し、中心部へ向かうイオン電流のパービアンズがある閾値を越えると球形状中心部で静電ポテンシャルの二重井戸構造（図3）ができ、このとき中性子発生率は電流の3乗以上に依存することを発見した。その検証のため、日本原研による公募型研究「原子力基礎研究」により、平成11年シュタルク効果を用いたレーザ誘起蛍光法で二重電位井戸電位分布の直接的計測に世界で初めて成功、30年間にわたる二重井戸電位分布の存在に関する論争に終止符を打った。さらに、イオンのエネルギー分布を計測し、グロー放電によるイオン生成では、ほとんどが1/3や1/2の印加電圧対応エネルギーのイオンしか生成できず、実効的核融合反応断面積が小さくなることを定量的に実証した。これらの結果を踏まえ、最近、低圧力で、かつ真空容器壁（陽極）近傍で効率よくイオンが生成できるマグネトロン放電の基礎実験を行い極めて有望な結果を得た。

## 3. 地雷探知への応用（京都大学学生新聞(H15.2.20号)より抜粋）

『昨年1月、世界61か国が参加したアフガン復興支援会議が東京で開かれ、今後のアフガン支援についての協議が行われた。その中で、アフガニスタンにおける人道的地雷除去支援が議題にあげられ、日本が率先して支援を進めていくことを小泉首相が宣言した。

1980年代のソ連アフガン侵攻など、アフガニスタンには紛争が絶えなかった。その影響で地雷や不発弾に汚染された地域も多く、調査済の地域だけでも合計834km<sup>2</sup>もある。このうち、住宅地や道路、農地など、緊急に除去が必要とされている地域が410km<sup>2</sup>になる。

生活環境圏内にこれだけの地雷が埋まっているのだから、犠牲者の数も多い。全国的統計は存在しないが、分かっているだけでも1か月に150～300人の被害者が出ているそうだ。チョウチョ型の地雷もあって、小さな子どもたちが興味本位に地雷に触れ、被害に遭うケースもあるらしい。

そのような中で、科学技術振興事業団（理事長・沖村憲樹）では昨年6月、「人道的観点からの対人地雷の探知・除去活動を支援するセンシング技術、アクセス・制御技術の研究開発」の研究提案を全国から募った。大学、独立行政法人、企業などの研究者から82件もの応募があり、最終的に12件の研究代表者および研究課題が採択された。

本学からは、エネルギー理工学研究所長・吉川潔教授が研究代表者となり、原子炉実験所・代谷誠治教授や学外7機関の参加による提案が採択されている。吉川教授らの研究課題は「超小型放電型中性子源による地雷探知技術の開発」。5年後の実用化を目指し、現在、研究が進められている。

地雷撤去に最先端技術を応用してほしいという要請が現地から寄せられる背景には、従来の技術による地雷撤去の限界という問題がある。かつて地雷は金属製容器内に爆薬が収納された型式だけだったが、現在はプラスチック製の厄介な地雷が多数存在している。探知にもきわめて慎重にならざるをえず、除去に多大な時間が費やされているのが現状だ。金属探知器に代わる、新たな探知技術が求められている。（中略）

居住区や農地などの優先除去地域では、除去率が100%でなければならない。地雷がわずかでも残っているかもしれない場所に、人が住むことはできないだろう。

そこで吉川教授らが提唱している技術が、「超小型放電型中性子源による地雷探知」だ。地中に中



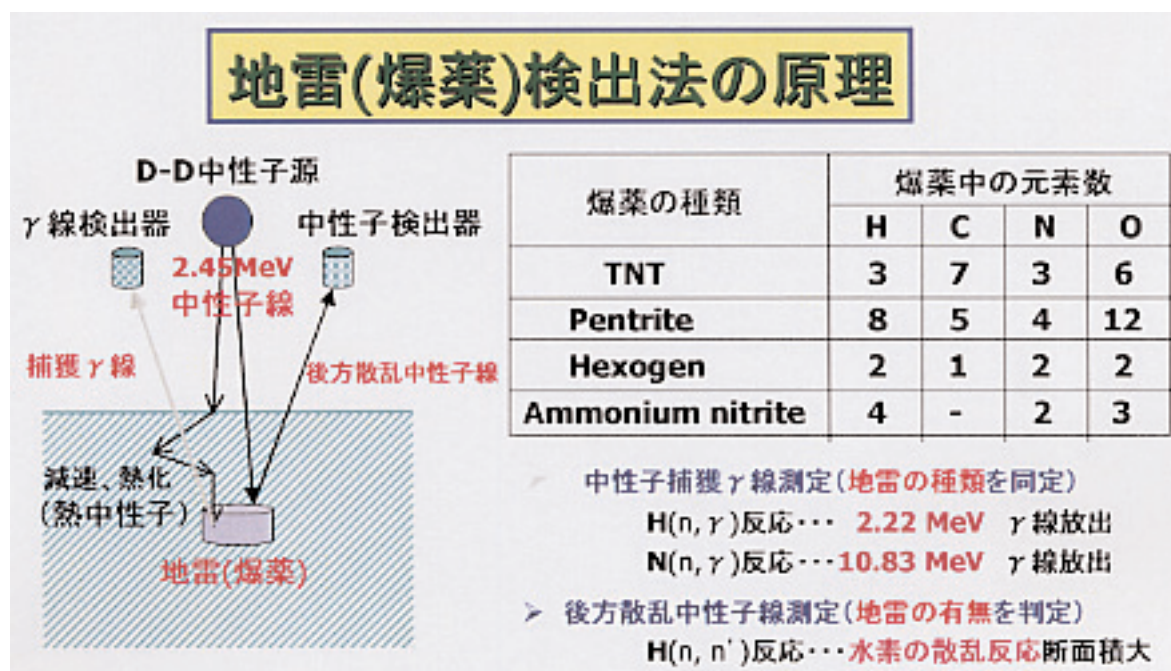


図4 核反応による地雷検出法

性を放射して地雷の有無を判定し、爆薬から放射されるガンマ線を検出して地雷の種類を同定する、シンプルだがきわめて有効な地雷検出法になっている。地雷が検出された場所にスプレーが散布され、安全かつ確実に地雷を処理できるというわけだ。

地雷検出の詳しい原理はこうだ。放電型中性子源から中性子線が地中に放射される。地中にH（水素）を多く含んだ物体（地雷には多くの水素が含まれる）があれば、水素による散乱が多くなりより多くの中性子が戻ってくるので、その量を中性子検出器で測定して水素を多く含む物体の有無を判断する。また、中性子を受けた物体は特定のエネルギーのガンマ線を放射するので、ガンマ線検出器でHやN（窒素）からの放射線を測定する（図4）。爆薬の種類によってHとNの比率が違うので地雷の種類が同定できる、という仕組みになっている。

吉川教授はもともと核融合によって中性子を発生させる装置の研究を進めており、「きわめて簡単な装置で核融合反応をおこす研究」を我が国で初めて着手したとして注目されていた。中性子発生源はガン治療や非破壊検査などに応用できるのだが、「応用の一環として昔から人道的地雷探査を見据えていた」と吉川教授は言う。一昨年の9月11日、奇しくも米国で同時多発テロが行われた日にサンクトペテルブルグで開催されたIAEA（国際原子力機関）の地雷に関するワークショップにオブザーバーとして招待され、中性子源応用の可能性について議論していたそうだ。（中略）

探知装置操作者の被曝線量も法的規制値を十分にクリア。地雷の被害者はもちろんのこと、地雷探知要員の安全も最優先だ。

今回の装置には、ガン治療用に開発された中性子捕獲ガンマ線の技術が応用されている。「地雷は地中のガンとも言えますから（笑）」。昨年12月アフガニスタンにおける国連地雷除去センター責任者を交えた国内会合でこう語ったら拍手喝采だったそうだ。「地雷のない日本には分からないことが多い。早くプロトタイプを完成させて（図5）、現地で実際に使用してもらいながら少しずつ改良していく」。そう語る吉川教授からは、研究は人のために貢献して当たり前という哲学が感じられた。』以上、京都大学学生新聞（H15.2.20）抜粋

#### 4. おわりに

現在、マグネトロン放電基礎実験により、中性子束の改善とパルス運転制御性についてめどをつけた。今後、大電力パルス源と組み合わせたパルス高中性子束生成、ならびに、検知計測システムとの統合、遠隔制御車両への搭載など、現地での地雷探知実地試験を目指した研究を加速する予定である。



図5 超小型核融合中性子源を用いた地雷探知遠隔制御車両